

DG



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 40 04 119 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
**G 01 N 22/04**  
H 03 L 7/06  
G 01 R 29/08  
H 01 P 7/00  
G 01 R 23/08  
// G 01 N 33/02, 37/00,  
G 01 R 27/02

②1 Aktenzeichen: P 40 04 119.0  
②2 Anmeldetag: 10. 2. 90  
④3 Offenlegungstag: 14. 8. 91

DE 40 04 119 A 1

⑦1 Anmelder:

Tews Elektronik Dipl.-Ing. Manfred Tews, 2000  
Hamburg, DE

⑦4 Vertreter:

Schmidt-Bogatzky, J., Dipl.-Ing. Dr.-Ing., 2000  
Hamburg; Wilhelms, R., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.;  
Kilian, H., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte, 8000  
München

⑦2 Erfinder:

Tews, Manfred, Dipl.-Ing.; Sikora, Jan, Dr.-Ing.;  
Herrmann, Rainer, Dipl.-Phys., 2000 Hamburg, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zur Messung der Feuchte eines Meßgutes mit Hilfe von Mikrowellen und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

DE 40 04 119 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung der Materialfeuchte eines Meßgutes mit Hilfe von Mikrowellen und eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

In zahlreichen industriellen Verfahrensprozessen ist die genaue Kenntnis des Feuchtegehaltes der dem Verfahrensprozeß unterworfenen Materialien von großer Bedeutung. Nur wenn die exakte Information über die Materialfeuchte der Schüttgüter, Lebensmittel-Produkte, Pasten usw. sofort vorliegt, kann regelnd auf die Parameter des Produktionsprozesses eingegriffen werden. In vielen Fällen hängt davon direkt die gewünschte Verbesserung der Produktqualität, der Produkthaltbarkeit und der energetisch optimalen Nutzung der Prozeßanlage ab.

Es sind daher schon die verschiedensten Meßmethoden zur Ermittlung der Feuchte von Stoffen vorgeschlagen worden, die auf Leitfähigkeitsmessung, kapazitiver Messung, Infrarotmessung, der Messung nach dem Neutronenstreuverfahren und dergleichen beruhen. Diese Verfahren haben jedoch die verschiedensten Nachteile, die ihre Einsatzfähigkeit einschränken. Bekannt sind auch verschiedene Verfahren, bei denen mit Hilfe von Mikrowellen die Feuchte eines Stoffes ermittelt werden soll. Diese basieren entweder als Reflektions-, Durchstrahlungs- oder Resonanzverfahren auf der großen Dielektrizitätskonstanten und dem großen Verlustfaktor des Wassers. Resonanzverfahren sind auch zur Messung der Feuchte eines Meßgutes mit Hilfe von Mikrowellen bekannt. Hierbei wird das als solches bekannte Meßgut in einem hinsichtlich seiner mechanischen und elektrischen Eigenschaften bekannten Applikator vermessen, der als Resonator ausgebildet ist. Voraussetzung für die Messung ist die Aufnahme einer Kalibrationskurve, wozu das Meßgut bei verschiedenen bekannten Feuchtegraden ausgemessen wird. Der Nachteil dieser bekannten Mikrowellenverfahren besteht darin, daß sie meist gleichzeitig zur Feuchtemessung eine Messung der Material-Dichte mit anderen Meßverfahren wie Wiegen und dergleichen erfordern, um die störende Beeinflussung der Mikrowellensignale durch Dichteschwankungen auszuschließen. Bisher bekannte dichteunabhängige Mikrowellen-Feuchtemeßverfahren weisen den großen Nachteil auf, daß sie nur bei einer begrenzten Anzahl von Materialien und in einem engen Bereich der Materialfeuchte einsetzbar sind, Vor- und Nachkalibrationen erfordern oder nicht vor Ort unter Prozeßbedingungen kalibriert werden können. Daher ergeben sich bei bisher bekannten Verfahren für den Einsatz zur Feuchtemessung bei industriellen Prozessen große Beschränkungen.

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein Verfahren der eingangs genannten Art so zu verbessern, daß mittels einer hierzu geeigneten Vorrichtung die Materialfeuchte in industriellen Prozessen mit großer Genauigkeit gemessen werden kann, ohne daß eine meßtechnische Abhängigkeit von der Dichte des Materials oder der Materialsorte besteht, wobei gleichzeitig auch unabhängig von dem jeweiligen Feuchtegehalt die Dichte des Materials durch Auswertung des Mikrowellensignals meßbar sein soll. Gleichzeitig soll der Einfluß der Materialsorte, deren Feuchte bestimmt werden soll, auf das Mikrowellensignal so verkleinert werden, daß bei Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung des Materials keine neue Kalibrationskurve aufgenommen werden muß.

Erfindungsgemäß erfolgt die Lösung der Aufgabe bezüglich des Verfahrens durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1 und bezüglich der Vorrichtung durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 8. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung werden in den abhängigen Ansprüchen beschrieben.

Der Einsatz der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann im Probe-Entnahme-Verfahren oder direkt im industriellen Prozeß erfolgen, wobei sich das Meßverfahren durch folgende Vorteile auszeichnet:

- Die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Messung am unveränderten Produkt ist gesteigert. Die Grenze der Meßgenauigkeit wird so allein durch die Qualität der Vergleichsmessung begründet, die dem Meßverfahren in Form einer Kalibrationskurve zugrunde liegt.

- Die Aufnahme einer Kalibrationskurve ist direkt im Prozeß, unter den Bedingungen des Einsatzes der Vorrichtung mit einfachster Bedienung möglich. Eine Vor- oder Nachkalibration entfällt.

- Nach Beginn der Messung steht das Meßergebnis in kürzest möglicher Zeit für die Prozeßsteuerung zur Verfügung (Meßzeit in der Regel etwa 1 s).

- Eine Veränderung der Materialdichte bei gleichbleibender Material-Feuchte – etwa durch Pressung oder Quellung des Materials, oder durch Veränderung der Korngröße, usw. – hat keinen Einfluß auf das Meßsignal. Das Meßverfahren ist dichte-unabhängig, es hängt nur von der Material-Feuchte ab. Damit ist auch ein gesondertes Verfahren zur Dichtemessung überflüssig, wie es bei gattungsgemäßen Vorrichtungen üblich ist, z. B. durch gleichzeitiges Wiegen des Meßgutes, durch Anforderung eines definierten Füll-Volumens oder durch radiometrische Methoden.

- Eine Veränderung der Sorte des Meßgutes, d. h. Veränderung des Meßgutes bei gleichbleibender Grundstruktur wie z. B. Wechsel der Tabak-Sorte, Kaffee-Sorte, Milch-Produkt-Sorte usw. wirkt sich für die Feuchtemessung nicht aus, da die Kalibrations-Kurve nur unwesentlich beeinflusst wird. Damit kann eine einmal aufgenommene Kalibrationskurve auch bei Veränderung der Material-Sorte beibehalten werden, solange die Grundstruktur des Materials erhalten bleibt.

Dies ist eine Folge der besonderen Signalverarbeitung und der Mikrowellen-Meßtechnik, wo der im niederfrequenten Bereich störende Einfluß der ionischen Leitfähigkeit von untergeordneter Bedeutung ist. Beim Wechsel des Materials anderer Grundstruktur können die unterschiedlichen Kalibrationskurven abgespeichert und im Bedarfsfall abgerufen werden.

- Durch die passende Wahl des Frequenzbereiches des Meßverfahrens sowie die besondere Anpassung des Applikators als Meßaufnehmer an das Meßgut wirken sich Inhomogenitäten im Bereich des erfaßten Materials nicht störend aus.

Die Materialfeuchte wird als Mittelwert gemessen, im Gegensatz zu Meßverfahren, die nur eine kleine, aktive Meßzone besitzen wie z. B. Infrarot-Verfahren oder Mikrowellen-Verfahren mit Wellenlängen unterhalb der Größe der Kornstrukturen des Meßgutes.

- Besondere Oberflächen-Effekte des Probenmaterials wirken sich bei diesem Meßverfahren nicht

aus. Die Mikrowelle durchdringt die Probe in der aktiven Zone und wird durch die Materialfeuchtigkeit des gesamten betroffenen Proben-Querschnitts in auswertbarer Weise beeinflusst. Damit scheiden systematische Meßfehler aus, wie sie etwa bei Reflexion-Meßverfahren auftreten. Bei Meßverfahren, wo eine an der Proben-Oberfläche reflektierte Mikro- oder Infrarot-Welle ausgewertet wird, entstehen beträchtliche Meßfehler durch eine Veränderung der Rauigkeit der Oberfläche, der Farbe, oder durch systematische Abweichungen der Oberflächenfeuchte von der Materialfeuchte wie z. B. durch oberflächliches Austrocknen oder durch Konzentration von Feuchte im Oberflächen-Bereich bei pasteusen Produkten nach Preß-Vorgängen.

Das Meßverfahren beruht physikalisch auf der Auswertung der Dipol-Relaxation der Wassermoleküle in einer feuchten Materialprobe. Hierzu wird das Meßgut in das elektromagnetische Feld des Resonators in einer optimalen, dem zu messenden Material angepaßten Form gebracht. Die Transmission eines Resonators hängt bei gegebenen geometrischen Abmessungen entscheidend von der Frequenz ab: Sie zeigt Resonanz-Verhalten. Befindet sich das zu messende Material im elektromagnetischen Feld des Resonators, wird die Resonanz-Frequenz des Resonators  $f(0)$  gegenüber jener des leeren Resonators  $f(L0)$  verkleinert, während die Halbwerts-Breite  $b(0)$  der Resonanzlinie gegenüber jener des leeren Resonators  $b(L0)$  vergrößert wird. Diese beiden Effekte sind um so größer, je größer die Feuchte des Materials ist. Die Resonanzfrequenz-Verkleinerung  $f(L0) - f(0)$  ist eine direkte Folge der Wellenlängenverkürzung vor allem durch das Wasser in der Probe, die Linienverbreiterung  $b(0) - b(L0)$  ist eine direkte Folge der Umwandlung von elektromagnetischer Energie in Wärme durch den Wasseranteil im Meßgut. Auf beide meßtechnisch erfaßbaren Parameter hat aber nicht nur die Material-Feuchte, sondern auch die Packungsdichte des Probenmaterials innerhalb des Feldbereichs des Resonators Einfluß. Bei richtiger Anpassung des Applikators an das Probenmaterial ist es immer möglich, die Einflüsse von Materialfeuchte und Materialdichte getrennt zu erfassen. Damit eignet sich das Verfahren hervorragend, gleichzeitig zwei Meßgrößen unabhängig voneinander zu messen, nämlich

- die Materialfeuchte unabhängig von der Packungsdichte, wenn mittels Referenzmessungen eine Feuchte-Kalibration durchgeführt wurde,
- die Materialdichte unabhängig von der Materialfeuchte, wenn mittels Referenzmessungen eine Dichte-Kalibration durchgeführt wurde.

Die Erfindung wird im folgenden am Beispiel der in den Zeichnungen dargestellten Vorrichtung näher erläutert. Es zeigt

Fig. 1 die Vorrichtung in einer schematischen Darstellung als Schaltbild,

Fig. 2 das Blockschaltbild der Vorrichtung nach Fig. 1,

Fig. 3 das Blockschaltbild der Auswerteinheit nach Fig. 2,

Fig. 3a bis 3f die Bauelemente der Auswerteinheit nach Fig. 3 in einer schematischen Darstellung,

Fig. 4 die Vorrichtung nach Fig. 1 in einer schematischen Vorderansicht,

Fig. 5a bis 5c den Meßschrank mit Resonator der Vorrichtung nach Fig. 1 in einer schematischen Seitenansicht, Queransicht und Draufsicht,

Fig. 6 ein Flußdiagramm über den zeitlichen Ablauf der Aufnahme der Resonanzkurve,

Fig. 7a bis 10b Diagramme mit Beispielen für die Feuchtemessung in einem pasteusen Produkt, in Tabak, in Röstkaffee und in einer feinkörnigen Pulversubstanz,

Fig. 11a eine schematische Darstellung eines Applikators in einer perspektivischen Ansicht,

Fig. 11b und 11c schematische Darstellungen der elektrischen Feldlinien zweier Sonden bei einem Applikator nach Fig. 11a,

Fig. 12 bis 14 weitere Ausbildungen eines Applikators in schematischen perspektivischen Ansichten,

Fig. 15 zwei Kalibrationskurven eines Stoffes gemessen bei zwei Resonanzfrequenzen nach Fig. 11b und 11c,

Fig. 16 eine schematische Darstellung der Auswertung einer mehrdeutigen Kalibrationskurve wie in Fig. 15.

In Fig. 1 ist der grundsätzliche Aufbau einer Vorrichtung 1 zur Feuchtemessung dargestellt. Diese besteht aus einem Applikator 4 in den eine Probe 11 eingeführt werden kann. In dem Applikator 4 sind zwei dem Resonator zugeordnete Ankopplungs-sonden 5, 6 ausgebildet. Die Ankopplungs-sonde 5 ist mit einem Mikrowellengenerator 3 verbunden. Die Ankopplungs-sonde 6 steht über einen Mikrowellenverstärker bzw. -Abschwächer 7 mit einer Detektor-Diode 8 in Verbindung, an die ein Analog/Digital-Wandler 9 angeschlossen ist. Dieser ist mit einem Prozessor 2 verbunden, der über einen Digital/Analog-Wandler 10 mit dem steuerbaren Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer 7 in Verbindung steht. Die gewünschte Frequenz des Mikrowellengenerators 3 wird vom Prozessor 2 über eine weitere Verbindung gesteuert. Zwischen dem Mikrowellengenerator 3 und der Ankopplungs-sonde 5 sowie der Ankopplungs-sonde 6 und dem Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer 7 ist jeweils zur Entkopplung ein Zirkulator 28 angeordnet. Meßwerte der Temperatur der Probe 11 werden ebenfalls dem Prozessor 2 zugeführt. Der Mikrowellengenerator 3 wird in einem weiten Frequenzbereich betrieben und weist eine PLL-Schaltung auf. Die Auswerteinheit kann z. B. mit einem 68020-Mikroprozessor mit Multitasking- und EPROM-fähigem OS-9-Echtzeit-Betriebssystem ausgerüstet sein. Sie übernimmt sowohl die Kommunikation mit dem Benutzer, die vom Benutzer dirigierte Datenverwaltung, die Durchführung der Meßaufgaben als auch die Weiterverarbeitung der Daten für eine Prozeß-Steuerung.

Mit dem vom Prozessor 2 digital-abstimmbaren quarzstabilen Mikrowellengenerator 3 wird die Mikrowellen-Leistung variabler Frequenz im notwendigen Frequenzbereich erzeugt. Die vom Prozessor 2 jeweils angeforderte Frequenz wird innerhalb weniger Millisekunden eingestellt (VCO im Rahmen einer PLL-Regelschleife) und dem Applikator 4 zugeführt, der das zu messende Probenmaterial enthält. Dabei erfaßt der Applikator 4 das Meßgut entweder in Form einer Meßprobe oder im "on-line"-Betrieb im Materialstrom.

Das aus dem Applikator 4 kommende Mikrowellen-Signal wird über einen einstellbaren integrierten Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer 7 einer Schottky-Barrier-Detektor-Diode 8 zugeführt, deren NF-Signal mittels eines Analog/Digital-Wandlers 9 vom Prozessor 2 ausgewertet wird.

Der Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer 7

wird vom Prozessor 2 so gesteuert, daß die Detektor-Diode 8 im Falle maximaler Transmittanz des als Resonator ausgebildeten Applikators 4, wenn die Mikrowellenfrequenz mit der aktuellen Resonanzfrequenz des Resonators übereinstimmt, immer die gleiche Mikrowellenleistung zugeführt bekommt.

Auf diese Weise kann die Resonanzlinie des Applikators 4 mit einer gegenüber herkömmlichen Resonator-Meßverfahren deutlich gesteigerten Genauigkeit ausgemessen werden, d. h. Resonanz-Frequenz  $f(0)$  und Linienbreite  $b(0)$  bestimmt werden. Durch die Prozessor-Steuerung des Mikrowellen-Generators 3 kann mit Hilfe einer PLL-Schaltung die gewünschte Mikrowellen-Frequenz in eng vorgegebenen Frequenz-Schritten exakt eingestellt werden. Durch die Prozessor-Steuerung des vorgeschalteten Mikrowellen-Verstärkers bzw. -Abschwächers 7 kann die Detektor-Diode 8 immer im gleichen Arbeitspunkt maximaler Signalleistung betrieben werden, wodurch der störende Einfluß von Nichtlinearitäten der Diode umgangen wird. Das Diodensignal einer Mikrowellenfrequenz kann weit außerhalb der Resonanz des Applikators 4 erfaßt und als Nullabgleich sowohl der gesamten Meß-Linie wie für die Auswertung der Resonanzlinie herangezogen werden.

Die so im normalen Betrieb für die Bestimmung von Resonanzfrequenz  $f(0)$  und Resonanzlinienbreite  $b(0)$  erreichte Meßgenauigkeit hat den relativen Meßfehler unter den Wert von

$$\delta f/f(0) < 3 \times 10^{-7}$$

gedrückt.

Fig. 2 zeigt ein schematisches Blockschaltbild der Vorrichtung 1 und verdeutlicht, daß diese als Hauptelemente den Applikator 4 für die zu messende Probe 11, eine Auswerteinheit 26 und einen Drucker 27 zur Ausgabe der Meßwerte aufweist. Fig. 3 zeigt ein Blockschaltbild der Auswerteinheit 26 mit einer schematischen Darstellung von deren Bauelementen. An einem Bus 29 ist eine Prozessorkarte 30, eine Terminalkarte 31, der Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer 7, der Mikrowellengenerator 3, eine Ein-Ausgabekarte 32 und ein Analogausgang 33 angeschlossen. Die Prozessorkarte 30 ist mit dem Rechner 2 verbunden. An die Terminalkarte 31 ist ein Display 34 zur Dialogführung und Beobachtung der Messung, eine Tastatur 35 sowie der Drucker 27 angeschlossen. Die Mikrowellen-Detektor-Karte 56 enthält den Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer 7, die Detektor-Diode 8, den Analog/Digital-Wandler 9 und den Digital/Analog-Wandler 10. Die Mikrowellengenerator-Karte 57 weist den Mikrowellengenerator 3 auf, dessen Ausgangssignal zum Applikator 4 geleitet wird. Die Ein-Ausgabekarte 32 dient zur Steuerung des Applikators 4. An den Analogausgang 33 kann eine Fernanzeige für die Prozeßregelung angeschlossen werden. Eine Digital-Schnittstelle erlaubt die Verbindung des Meßgeräts mit einem Prozeß-Leitrechner.

In den Fig. 3a bis 3f sind die in der Prozessorkarte 30, der Terminalkarte 31, dem Applikator 4, dem Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer 7, dem Mikrowellengenerator 3, der Ein-Ausgabekarte 32 und dem Analogausgang 33 enthaltenen wesentlichen Bauelemente angegeben.

Fig. 4 zeigt die Vorrichtung 1 in einer schematischen Seitenansicht. Die Auswerteinheit 26 mit Display 34 und Tastatur 35 weist einen Netzanschluß 37 und eine Schnittstelle 38 auf, an die z. B. der Drucker 27 ange-

schlossen werden kann. Mittels Meßleitungen 39, 40 und einer Steuerleitung 41 ist die Auswerteinheit 26 mit den Ankopplungs sonden 5, 6 und einer Füllstandssonde 42 verbunden, die im Resonator 22 bzw. in Materialflußrichtung vor diesem im Probenrohr 43 angeordnet sind. Der Resonator 22 und das Probenrohr 43 befinden sich in einem Meßschrank 36. In Materialflußrichtung vor und hinter dem Resonator 22 ist jeweils ein Absperrorgan 44, 45 vorgesehen. Die Absperrorgane 44, 45 werden über Magnetventile 46, die an eine Druckluftleitung 47 angeschlossen sind, mit Druckluft beaufschlagt. Die Magnetventile 46 werden durch Relais 48 gesteuert. Die Relais 48 sind mit der Steuerleitung 41 verbunden und an eine Spannungsversorgung 50 angeschlossen. Ferner ist in dem Probenrohr 43 ein Spülluftstutzen 49 vorgesehen, der ebenfalls mit den Magnetventilen 46 verbunden ist. Fig. 5a bis 5c zeigen den Meßschrank 36 in verschiedenen Ansichten. Das Relais 48 ist über Klemmen 51 mit der Spannungsversorgung 50 verbunden. Der Materialzulauf 53 ist am oberen Abschnitt des Meßschrankgehäuses 52 angeordnet und dient zum Einfüllen von Meßgut. Am Boden des Meßschrankgehäuses 52 ist ein Druckluftanschluß 54 für die Druckluftleitung 47 vorgesehen. Über ein zweites Absperrorgan 45 wird das Produkt in den Produkt-Hauptstrom zurückgeführt.

Fig. 6 zeigt in einem Fluß-Diagramm den zeitlichen Ablauf der verschiedenen Rechner-Schritte bei der Steuerung des Prozesses der Aufnahme der Resonanzkurve. Sie verlaufen

- von der Suche des aktuellen Resonanz-Maximums
- über den Nullabgleich weit außerhalb der Resonanz,
- zur Festlegung der notwendigen Mikrowellen-verstärkung bzw. -Abschwächung, um den Maximalwert der Resonanzkurve auf einen vorgewählten Wert zu bekommen,
- weiter zur Aufnahme der exakten Meßpunkte der Resonanzkurve,
- bis hin zur rechnerischen Polynom-Interpolation der Resonanz-Linien-Meßwerte, zur genauen Bestimmung von Resonanzfrequenz  $f(0)$  und Halbwertsbreite  $b(0)$ .

Wie bereits erwähnt, sind beide Meßgrößen  $f(0)$  und  $b(0)$  sowohl von der Materialfeuchtigkeit wie von der Materialdichte abhängig. Der Einfluß beider Größen läßt sich jedoch trennen. Unter der Voraussetzung, daß für die Meßaufgabe der richtig angepaßte Resonator-Typ verwendet wird, können für beliebige dielektrische Stoffe bis in den Bereich sehr hoher Dielektrizitätskonstanten und somit auch hoher Materialfeuchte der Einfluß von Materialfeuchtigkeit und Material-Dichte getrennt werden.

Wenn  $p$  die Dichte des Materials bezeichnet, das sich im Resonator-Feld befindet und  $\psi$ , die relative Materialfeuchtigkeit darstellt, dann zeigt die Messung, daß die Breitenänderung  $b(0) - b(L)$  und die Frequenzänderung  $f(0) - f(L)$  der Resonanzlinie in gegenüber den experimentell zu bestimmenden Bezugsgrößen  $b(L)$  und  $f(L)$  der gleichen Weise der Dichte des Materials abhängen, unabhängig von der Material-Feuchtigkeit. Diese gemeinsame Dichtefunktion  $X(p)$  nimmt mit zunehmender Dichte monoton und im allgemeinen als nichtlineare Funktion von  $p$  zu.

Wesentlich ist, daß es auf experimentellen Wege möglich ist, die Bezugsgrößen  $b(L)$  und  $f(L)$  zu bestimm-

men, so daß eine einzige Funktion  $X(\rho)$  angegeben werden kann, die die Dichteabhängigkeit von  $b(0) - b(L)$  und  $f(0) - f(L)$  in gleicher Weise beschreibt. Damit gilt folgender Produktsatz für die Beziehung zwischen den unmittelbaren Meßgrößen  $b(0)$  und  $f(0)$  und den zu messenden Stoffgrößen Feuchte  $\psi_r$  und Dichte  $\rho$ , wobei die empirischen Bezugsgrößen für die Linienbreite  $b(L)$  und die Resonanzfrequenz  $f(L)$  charakteristisch für einen Resonator-Typ sowie die zu vermessende Materialsorte sind.

$$b(0) - b(L) = y_b(\psi_r) \cdot X(\rho) \quad (1)$$

$$f(L) - f(0) = y_f(\psi_r) \cdot X(\rho) \quad (2)$$

Eliminiert man durch Division den dichteabhängigen Faktor  $X(\rho)$  des Produktsatzes erhält man eine Größe  $\Phi$ , die vollkommen unabhängig ist von der Dichte  $\rho$  des Materials und nur von der Feuchtigkeit  $\psi_r$  abhängt:

$$\Phi(\psi_r) = \frac{b(0) - b(L)}{f(L) - f(0)} = \frac{y_b(\psi_r)}{y_f(\psi_r)} \quad (3)$$

Diese Größe  $\Phi$ , die aus den primären Meßgrößen  $b(0)$ ,  $f(0)$  und den konstanten Bezugsgrößen  $b(L)$ ,  $f(L)$  gewonnen wird, ist das eigentliche Meß-Signal der Vorrichtung 1 zur Feuchtemessung. Sie ist nur von der Materialfeuchte abhängig. Wenn sie in der Vorrichtung 1 als Kalibrationskurve abgespeichert vorliegt, kann nach der Bestimmung von  $\Phi$  die Materialfeuchte  $\psi_r$  angezeigt werden.

Trägt man die gemessene Linienbreite  $b(0)$  der Resonanz-Linie als Funktion der Resonanzfrequenz  $f(0)$  bei konstanter Materialfeuchte und variabler Dichte auf, zeigt sich der Einfluß der Dichteschwankung wie folgt. Die Meßwerte von Linienbreite  $b(0)$  und Resonanzfrequenz  $f(0)$  verändern sich so, daß die Meßpunkte  $b(0)$  über  $f(0)$  auf einer Geraden liegen, die durch den Punkt mit den empirischen Parametern  $f(L)$ ,  $b(L)$  verläuft und deren Steigung alleine von der Feuchtigkeit des Materials abhängt. Nach Gleichung (3) gilt die Geraden-Gleichung

$$b(0) = \frac{y_b(\psi_r)}{y_f(\psi_r)} \cdot (f(L) - f(0)) + b(L) \quad (4)$$

Somit wird auch die Bedeutung der empirischen Parameter  $b(L)$  und  $f(L)$  deutlich. Sie stellen in der Resonanzfrequenz-Breite-Auftragung den gemeinsamen Schnittpunkt aller durch Dichte-Variation entstandenen Geraden dar, die sich voneinander in der Materialfeuchtigkeit, d. h. in der Geraden-Steigung unterscheiden, wie es z. B. in Fig. 7a dargestellt ist.

Diese beiden empirisch zu bestimmenden Parameter  $b(L)$  und  $f(L)$  sind für die Verwendung eines bestimmten, für das zu bearbeitende Prozeßfeuchte-Meßproblem optimal angepaßten Resonatortyp durch eine charakteristische Beziehung definiert und werden für den Applikator 4 in der Software des Rechners 2 definiert.

Diese Parameter hängen mit den Kenngrößen der Mikrowellen-Resonanz-Linie des Resonators ohne Meßgut, der Leer-Linienbreite  $b(L0)$  und der Leer-Resonanzfrequenz  $f(L0)$ , über folgende Gleichungen zusammen:

$$b(L) = b(L0) + B \quad (5)$$

$$f(L) = f(L0) + F \quad (6)$$

Die beiden Korrekturgrößen  $B$  und  $F$  für die Abweichung des Dichte-Geraden-Schnittpunktes bei variabler Materialfeuchte von dem Leer-Resonator-Punkt hängen sowohl vom Resonator-Typ wie von der Anpassung des Resonators an das zu messende Material ab.

Insbesondere ändern sich  $B$  und  $F$  nicht, wenn sich die Leer-Resonator-Daten  $b(L0)$  und  $f(L0)$  infolge von Veränderungen am Applikator 4 im Verlaufe der Messungen vor Ort verändern sollten, zum Beispiel durch Verschmutzungen des Applikators oder durch thermische Ausdehnung bei Veränderung der Einsatz-Temperatur.

Damit ist es nach den Gleichungen (5) und (6) möglich, den Einfluß von Verschmutzungen des Applikators 4 oder anderer Veränderungen dadurch zu kompensieren, daß einfach die Resonanz-Daten des leeren Resonators  $b(L0)$  und  $f(L0)$  im normalen Dauerbetrieb der Vorrichtung 1 gemessen werden. Mit den Gleichungen (5) und (6) werden die neuen Bezugsgrößen  $b(L)$  und  $f(L)$  berechnet und nach Gleichung (3) das Meßsignal aus den direkten Meßgrößen  $b(0)$ ,  $f(0)$  bestimmt. Trotz Verschmutzung kann dann mit der gleichen hohen Meßgenauigkeit der Vorrichtung unter Verwendung der alten Kalibrationskurve weitergearbeitet werden.

Entsprechend kann bei Reinigung des Applikators 4 verfahren werden. Durch einfache Messung der Leer-Resonator-Daten ist die Vorrichtung 1 zur Feuchtemessung sofort wieder einsetzbar, ohne daß eine Neu-Kalibration erforderlich ist.

In Fig. 7a und 7b ist am Beispiel eines zur Feuchtemessung in Marzipan angepaßten Resonators das durch Gleichung (4) beschriebene Verhalten bei Variation der Packungsdichte von Marzipan dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, daß die Linienbreite und Resonanz-Frequenz sich längs einer Geraden bewegen, deren Steigung allein von der Materialfeuchtigkeit bestimmt ist. Der durch die Korrekturgrößen  $B$ ,  $F$  gekennzeichnete Schnittpunkt weicht deutlich vom Leer-Resonatorpunkt ab. Daraus ergibt sich die in Fig. 7a und 7b für die Feuchte-Messung in Marzipan typische Kalibrationskurve, wo die nach Gleichung (3) definierte Meßgröße  $\Phi$  über der Referenzfeuchtigkeit (Trockenschrank-Methode) aufgetragen ist.

Fig. 8a und 8b zeigen die entsprechenden Meßergebnisse an Tabak im Bereich zwischen 11 und 25 Prozent Materialfeuchte, wobei auch hier die Vergleichsmessungen zur Kalibration der Anlage mit dem Trockenschrank durchgeführt wurden.

Bei dieser Anwendung tritt die Besonderheit zutage, daß die Korrekturgrößen  $B$ ,  $F$  in Gleichung (4) und (5) nahezu Null werden, d. h., die Leerresonator-daten selber in Gleichung (3) die Bezugsgrößen bilden. Weiter sieht man, daß sich die Kalibrationskurve der Meßgröße  $\Phi$  bei einem Wechsel der Tabak-Sorten mit unterschiedlichem Anbaubgebiet und unterschiedlicher Vorbehandlung nur geringfügig ändert.

Noch deutlicher wird diese Sortenunabhängigkeit des Meßsignals bei dem in Fig. 9a und 9b dargestellten Kalibrationskurven-Vergleich von Röst-Kaffeebohnen unterschiedlichster Röstverfahren: Unabhängig von Anbaubgebiet und Röstverfahren gilt zur Feuchtemessung die gleiche Kalibrationskurve.

Ursächlich für diese Sortenunabhängigkeit des Meßverfahrens sind die Herabsetzung des Einflusses von Ionen-Leitfähigkeitseffekten durch die Verwendung der Mikrowellen-Meßtechnik sowie die besondere Art der nach Gleichung (3) durchgeführten Signalverarbeitung.

Noch vorhandene Sorteneinflüsse wirken sich auf Resonanzfrequenz-Verschiebung und Linienverbreiterung ähnlich wie die Materialdichte-Änderung in gleicher Weise aus und werden bei der Division in Gleichung (3) zur Erlangung des Meßsignals herausgekürzt.

Fig. 10a und 10b zeigt anhand von Feuchtemessungen in Automaten-Kakao-Pulver, daß sich sogar bei deutlicher Variation von Zusatzstoffen im Meßgut, wie hier von Zucker, die Kalibrationskurve des Meßsignals nicht ändert, d. h. nach wie vor mit einer einzigen Kalibrationskurve gearbeitet werden kann.

Die Aufnahme einer Kalibrationskurve kann in einfacher Weise vom Betreiber der Vorrichtung 1 unter Einsatzbedingungen aufgenommen werden, sobald er die Möglichkeit hat, durch eine Referenzmessung die Referenzfeuchte für die Kalibration zu bestimmen (z. B. durch Anwendung der Trockenschrank-Methode). Eine gesonderte Zweitmessung mit Proben definierter Form und Zusammensetzung entfällt ebenso wie der Zwang zur Ausmessung der Mikrowelleneigenschaften des ausgetrockneten Proben-Materials, wie es bei anderen bekannten Mikrowellen-Verfahren notwendig ist.

Damit die in den Gleichungen (1) bis (6) beschriebenen Gesetzmäßigkeiten gelten, muß der Applikator an die jeweilige Feuchtemeßaufgabe angepaßt werden. Hierbei ist folgendes zu beachten:

— Die Ankopplung der zu messende Probe 11 an den Resonator des Applikators 4 hat so zu erfolgen, daß sein Resonanzverhalten nur wenig gestört wird.

— Entelektrisierungseffekte, und damit eine mehr oder weniger vollständige Verringerung der Feuchte-Empfindlichkeit der in Gleichung (3) definierten Meßgröße  $\Phi$  lassen sich vermeiden, indem dafür gesorgt wird, daß das elektrische Feld des Resonators beim Übergang in das Material der Probe 11 parallel zur Oberfläche verläuft. Das elektrische Feld darf nicht senkrecht zur Meßmaterial-Oberfläche in die Probe 11 eintreten.

Diese Bedingungen lassen sich durch die besondere Ausbildung des Resonatortyps zur Anpassung an die Meßaufgabe erfüllen.

Eine für viele Einsatzfälle zur Materialfeuchtemessung befriedigende Lösung wird dann erreicht, wenn ein kreiszylindrischer Resonatortyp so konstruiert wird, daß in dem in Frage kommenden Frequenzbereich die H<sub>311</sub>- und H<sub>211</sub>-Resonanzen angewandt werden können. Dazu muß der Resonator in dem Mittenbereich, in dem die elektrische Feldstärke minimal wird zur Probeneinführung mit einer Öffnung und einer Innenverkleidung versehen werden. Ein solcher Applikator 4 ist in Fig. 11a dargestellt. Koaxial zur Längsachse 19 ist ein Rohr 20 durch den Resonator geführt. Zwischen dem Rohr 20 aus dielektrischem Material und dem Resonatormantel 21 sind einander gegenüberliegend die Ankopplungs sonden 5, 6 angeordnet.

Mit einem derartigen Applikator 4 können insbesondere Schüttgüter im Prozeß "on-line" oder mit Probenentnahme vermessen werden. Pasteuse Produkte oder Materialien, die ein Gefäß benötigen, können z. B. in einem becherförmigen Probenhalter in den Resonator eingebracht werden. Eine besondere Anforderung an die Probenform muß nicht gestellt werden. Der maximal mögliche Durchmesser des Rohres 20 ist durch die Forderung begrenzt, daß es in Folge der Wellenlängenverkürzung im Probenmaterial nicht zu elektromagnetischen

Abstrahlungen kommt.

Wie in Fig. 11b und 11c zeigen, können im meßbaren Frequenzbereich zwei Resonanzlinien gleichzeitig am selben Produkt ausgemessen werden, die sich um etwa 25 Prozent in ihrer Resonanzfrequenz unterscheiden. Es sind die H<sub>311</sub>-Resonanz mit hexagonaler und die H<sub>211</sub>-Resonanz mit quadratischer Feldsymmetrie, die beide die eingangs erwähnten Bedingungen dadurch erfüllen, daß die zu messende Probe 11 im Randbereich des elektrischen Feldes des Resonators, also in seiner Mitte, angeordnet wird.

Die in den Fig. 8a und 8b an Tabak und in den Fig. 9a und 9b an Röstkaffee beispielhaft dargestellten Meßergebnisse wurden mit einem Applikator gemäß Fig. 11a gewonnen.

Auch eine besondere Konstruktion des kreiszylindrischen Resonators, die im zugänglichen Frequenzbereich die E<sub>010</sub>-Resonanz aufweist, also die Grund-Resonanz des kreiszylindrischen Resonators, kann für die Feuchtemeßtechnik in besonderen Anwendungsfällen sinnvoll genutzt werden.

Insbesondere bei Materialien mit kleiner Dielektrizitätskonstante, die eine langgestreckte Form haben (z. B. am Zigarettenstrang, Wollfäden, usw.) oder die sich in eine langgestreckte Form bringen lassen (z. B. feinkörnige Schüttgüter) kann ausgenutzt werden, daß das elektrische Feld parallel zur Probenoberfläche verläuft. Für diese Anwendungen ist der in Fig. 12 dargestellte zylinderförmige Applikator 4 besonders gut geeignet. Das Proben-Rohr besteht aus dielektrischem Material. Die Probe 11 wird durch eine Öffnung an der einen Stirnfläche 12 zugeführt und tritt aus der anderen Stirnfläche 13 aus. Hier wird die E<sub>010</sub>-Resonanz eines kreiszylindrischen Resonators zur Feuchtemessung genutzt.

Die in Fig. 10a und 10b für Kakao-Pulver dargestellten Meßpunkte wurden mit einem Applikator 4 gemäß Fig. 12 gewonnen.

Bei Meßaufgaben, wo die Dielektrizitätskonstante des Materials oder die Materialfeuchtigkeit größer sind (z. B. Feuchtemessung in Marzipan, pasteusen Produkten usw.), kann dieser Resonatortyp verwendet werden, wenn die Probe 11 dünn auf einem dielektrischen Substrat ausgewalzt oder aufgestrichen wird. Dann wird das elektrische Feld beim Eintritt in die Oberfläche der Probe kaum geschwächt. Die in Fig. 7a und 7b für Marzipan dargestellten Meßpunkte wurden auf diese Weise gewonnen.

Für die Feuchtemessung in Folien, Papier- oder Textilbahnen, usw. eignet sich eine kreiszylindrische oder rechteckige Ausbildung eines Applikators 4, der in der E<sub>010</sub>-Resonanz angeregt werden kann. Dazu wird wie in Fig. 13 der Resonator in Richtung der Wandströme aufgeschnitten, mit einer dielektrischen Innenverkleidung versehen und mechanisch so befestigt, daß die Materialbahn 14 in Richtung des elektrischen Feldes durch den Schlitz 17 des Resonators 4 geführt wird. Mikrowellen-Detektor und -Generator können entweder mit den unterschiedlichen Resonatorhälften wie abgebildet verbunden sein, oder mit ein und derselben Resonatorhälfte.

Ein weiterer, für zahlreiche Anwendungsfälle zur Feuchtemessung vor allem in pasteusen Produkten geeigneter Applikator 4 ist in Fig. 14 dargestellt. Auch hier kann die der Gleichung (3) zugrundeliegende Gesetzmäßigkeit bei Einhaltung definierter Bedingungen angewendet werden. Der zylindrische geschlossene Resonator 22 wird wieder im E<sub>010</sub>-Modus betrieben.

Durch die untere Stirnfläche 23 sind die Ankopp-

lungssonden 5, 6 geführt. Über eine durch die obere Stirnfläche 24 geführte Koaxialleitung 18 der Länge einer viertel Wellenlänge wird ein kleiner Anteil der Mikrowelle im Resonator 22 ausgekoppelt. Am freien Endabschnitt 25 der Koaxialleitung 18 dringt das Streufeld der elektromagnetischen Welle in die Probe 11 ein, die sich auf einem Probenträger 55 befindet. Die Bedingung des parallelen Eindringens der elektrischen Feldstärke in die Probenoberfläche kann durch die Wahl des geeigneten Abstands der Probe von der Öffnung des Koaxial-Resonators erfüllt werden. Zur Messung von  $\Phi$  wird die Wechselwirkung des feuchten Materials der Probe 11 mit dem elektrischen Streufeld am offenen Abschluß der Koaxialleitung 18 ausgenutzt.

Der Vorteil dieser Meßmethode ist trotz des relativen kleinen vom elektrischen Feld erfaßten Proben-Bereiches, daß das Probenmaterial nicht durch den Resonator hindurchgeführt werden muß. Vielmehr kann das Material über die aktive Zone des Applikators 4 hinweggeführt werden, wenn der Applikator 4 an Materialführungen, Auflageplatten, Rohrleitungen, usw. angeflanscht oder eingeschraubt wird.

Die beschriebenen Arten von Applikatoren 4 zeigen, daß das auf Gleichung (3) beruhende dichte- und sorten-unabhängige Mikrowellenmeßverfahren für die Materialfeuchte durch die passende Wahl des Applikators 4 auf eine Vielzahl der in der Praxis vorkommenden Aufgabenstellungen angewendet werden kann.

Die meßtechnische Auswertung des nach Gleichung (3) erhaltene Meßsignal  $\Phi$  bereitet in einigen Anwendungsfällen das Problem, daß mit zunehmender Materialfeuchte die Größe  $\Phi$  nicht wie in den Fig. 7a bis 10b kontinuierlich ansteigt, sondern nach Überschreiten eines Maximums wieder abnimmt. Wenn dieses Maximum aber in einen für den Anwender interessanten Feuchtebereich fällt, würde es bei der Auswertung von  $\Phi$  zu möglichen Zweideutigkeiten in der Zuordnung von  $\Phi$  und der Materialfeuchte  $\psi_r$  kommen.

In Fig. 15 ist dies am Beispiel von Parmesan-Käse demonstriert, wo bei einer Feuchte von etwa 17% die Kalibrationskurve ihr Maximum hat, der interessante Feuchtebereich für den Produktionsprozeß aber zwischen 8 und 25% liegt.

Durch die Möglichkeit, gleichzeitig bei zwei und mehr Frequenzen das Resonanzverhalten messen zu können, kann die Vorrichtung 1 unter voller Beibehaltung aller Vorzüge des Problems der Zweideutigkeit überwinden, da die beiden Kalibrationskurven bei den zwei Frequenzen sich voneinander unterscheiden (Fig. 15).

Eine Möglichkeit zur Überwindung der Zweideutigkeit ist in Fig. 16 dargestellt. Danach werden die zwei Meßsignale  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  bei beiden Frequenzen mit der jeweils gültigen Kalibrationskurve links und rechts des Maximums in einen Feuchtwert umgewandelt. Die korrekte Feuchte ergibt sich dann als Mittelwert aus den zwei Feuchtwerten, deren Differenzbetrag minimal ist.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung der Materialfeuchte eines Meßgutes mit Hilfe von Mikrowellen, bei dem durch einen Prozessor gesteuert in einem Mikrowellen-Generator eine elektromagnetische Strahlung variabler Frequenz erzeugt und einem als Resonator ausgebildeten Probenapplikator zugeführt wird, bei dem das aus dem Applikator austretende Mikrowellensignal einer Detektor-Diode zuge-

führt wird, aus deren Signalen über einen Analog/Digital-Wandler vom Rechner als primäre Meßgrößen  $b(0)$  und  $f(0)$  ermittelt werden, wobei  $b(0)$  die Halbwertsbreite bei der Resonanzfrequenz  $f(0)$  des mit einer Meßprobe in Wirkverbindung stehenden Applikators ist, dadurch gekennzeichnet, daß mit dem Resonator eine Materialprobe so in Verbindung gebracht wird, daß das elektrische Feld des Resonators beim Übergang in das Material der Probe allgemein parallel zur Oberfläche verläuft und daß aus den primären Meßgrößen  $b(0)$  und  $f(0)$  ein Meßsignal  $\Phi$  gebildet und mit diesem unter Berücksichtigung einer im Rechner abgespeicherten Kalibrationskurve für die zu messende Materialsorte die Materialfeuchte ermittelt wird, wobei für das von der Materialfeuchte  $\psi_r$  abhängige Meßsignal  $\Phi(\psi_r)$  die Beziehung gilt

$$\Phi(\psi_r) = \frac{b(0) - b(L)}{f(L) - f(0)}$$

mit  $b(L)$  und  $f(L)$  als konstante material- und applikatorabhängige Bezugsgrößen, die nach den Beziehungen

$$b(L) = b(L_0) + B$$

$$f(L) = f(L_0) + F$$

ermittelt werden, bei denen  $b(L_0)$  und  $f(L_0)$  die Halbwertsbreite bzw. Resonanzfrequenz des Applikators ohne Meßgut und  $B$  und  $F$  applikatoretypische Konstanten sind, die abhängig von dem zu vermessenden Material so bestimmt werden, daß das Meß-Signal  $\Phi(\psi_r)$  von der Packungsdichte des Materials unabhängig und nur von der Materialfeuchte abhängig ist und daß durch Messung von  $b(L_0)$  und  $f(L_0)$  und Neuberechnung von  $\Phi$  störende Einflüsse von Resonator-Verschmutzungen und Resonator-Temperaturänderungen kompensiert werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß durch den Prozessor nach dem Einbringen einer Probe in den Wirkbereich des Applikators durch Variation der Frequenz des Mikrowellengenerators das auf die Probe bezogene aktuelle Resonanz-Maximum ermittelt wird, daß dann der Nullabgleich des SONDENSIGNALS außerhalb der Resonanz vorgenommen wird, dann der Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer von dem Prozessor so eingestellt wird, daß der Maximalwert der Resonanzkurve einem vorgewählten Wert entspricht und somit Diodennichtlinearitäten sich nicht störend auf die Messung auswirken, dann die exakten Meßpunkte der Resonanzkurve aufgenommen werden und dann aus einer Polynom-Interpolation der Resonanz-Linien-Meßwerte die Resonanzfrequenz  $f(0)$  und Halbwertsbreite  $b(0)$  ermittelt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßprobe in den Mittenbereich eines kreiszylindrischen oder Rechteck-Resonators parallel zur Achse des Applikators eingeführt wird, daß in dem Applikator im Falle des kreiszylindrischen Resonators die  $E_{010}$ -, oder die  $H_{211}$ - oder die  $H_{311}$ -Resonanz, im Fall des Rechteck-Resonators die  $H_{011}$ -Resonanz angeregt wird,

so daß das elektrische Feld parallel zur Probenoberfläche in die Probe eintritt.

4. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Probe auf einem dielektrischen Substrat dünn ausgewalzt oder aufgestrichen oder in Dünnschichtform vorliegend in den Applikator entlang der E-Feld-parallelen Längsachse eines kreiszylindrischen- oder Rechteck-Resonators eingebracht und die Grundresonanz angeregt wird, so daß auch Proben beliebig hoher Feuchte vermessen werden können.

5. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß eine dünne großflächige Probe zwischen den zwei Hälften eines entlang der E-Feld-parallelen Längsachse aufgeschnittenen kreiszylindrischen- oder Rechteck-Resonators geführt und die Grundresonanz angeregt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß aus dem geschlossenen kreiszylindrischen- oder Rechteck-Resonators, in dem die Grundresonanz angeregt wird, über eine Koaxialleitung der Länge einer Viertel-Wellenlänge ein kleiner Teil der Mikrowellenleistung im Resonator ausgekoppelt und die Probe so durch das Streufeld der elektromagnetischen Welle am offenen Ende der Koaxialleitung geführt wird, daß die elektrischen Feldlinien parallel zur Probenoberfläche in die Probe eintreten.

7. Verfahren nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß bei einer Zweideutigkeit zwischen dem Meßwert  $\Phi$  und der Materialfeuchte  $\psi$ , (Maximum oder Minimum der Kalibrationskurve) die Meßsignale  $\Phi_1$  und  $\Phi_2$  in zwei Resonanzmoden unterschiedlicher Resonanzfrequenz erfaßt werden und die Materialfeuchte eindeutig so bestimmt wird, daß die aus den Meßwerten  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  errechnete Feuchte einen minimalen Differenzbetrag aufweist.

8. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7, gekennzeichnet durch einen von einem Prozessor (2) digital abstimmbaren Mikrowellengenerator (3) mit variabler Frequenz, der mit einer Ankopplungs-sonde (5) verbunden ist, die in einem Applikator (4) zur Messung der Materialfeuchte einer Probe (11) angeordnet ist, der eine weitere Ankopplungs-sonde (6) aufweist, die über einen Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer (7) mit einer Detektor-Diode (8) verbunden ist, deren Signalausgang mit dem Prozessor (2) verbunden ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz des Mikrowellengenerators (3) mittels einer quarzstabilisierten PLL-Regelschleife einstellbar ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektor-Sonde (8) mit dem Prozessor (2) über einen Analog/Digital-Wandler (9) verbunden ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Prozessor (2) und der Mikrowellen-Verstärker bzw. -Abschwächer (7) über einen Digital/Analog-Wandler (10) miteinander verbunden sind.

12. Vorrichtung nach Anspruch 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Prozessor (2) mit einer Meßproben-Temperaturmeßeinrichtung verbunden ist, die dem Applikator (4) zugeordnet ist.

13. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Applikator (4) als kreiszylindri-

scher- oder Rechteck-Resonator mit mittiger zur Längsachse (19) koaxialer Durchbrechung zur Einführung einer Probe (11) ausgebildet ist.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Durchbrechung durch ein durch den Resonator geführtes Rohr (20) gebildet ist, das aus dielektrischem Material besteht.

15. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Resonator (4) aus zwei Resonatorhälften (15, 16) besteht, die als Halbkreiszylinder oder Quader ausgebildet und unter Ausbildung eines Schlitzes (17) im Abstand voneinander angeordnet sind.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die einander zugewandten Innenflächen der Resonatorhälften (15, 16) aus einer dielektrischen Verkleidung bestehen.

17. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Applikator (4) aus einem geschlossenen zylindrischen oder Rechteck-Resonator (22) besteht, durch dessen eine Stirnfläche (23) die Ankopplungs-sonden (5, 6) und durch dessen andere Stirnfläche (24) mittig eine Koaxialleitung (18) geführt ist, deren freier Endabschnitt (25) im Bereich der Führung für die Probe (11) angeordnet ist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 8 bis 17, gekennzeichnet durch einen Meßschrank (36) mit als Resonator (22) ausgebildetem Applikator (4) und einer Auswerteinheit (26), zwischen denen zwei Meßleitungen (39, 40) und eine Steuerleitung (41) angeordnet ist.

19. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswerteinheit (26) ein Display (34), eine Tastatur (35), eine Schnittstelle (38) zum Anschluß von Peripheriegeräten, einen Netzanschluß (37) und einen Bus (29) für eine Prozessor-karte (30), eine Terminalkarte (31), eine Mikrowellen-Detektor-Karte (56), eine Mikrowellengenerator-Karte (57), eine Ein-Ausgangskarte (32) und einen Analogausgang (33) aufweist.

20. Vorrichtung nach Anspruch 18 und 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuerleitung (41) mit einer im Probenrohr (43) angeordneten Füllstands-sonde (42) und einem Relais (48) für Magnetventile (46) von zwei Absperrorganen (44, 45) verbunden ist, die in dem Probenrohr (43) beidseitig des Resonators (22) angeordnet sind.

21. Vorrichtung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Absperrorgane (44, 45) über die Magnetventile (46) mit einer Druckluftleitung (47) verbunden sind.

22. Vorrichtung nach Anspruch 18 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß das Probenrohr (43) in dem Meßschrank (36) vertikal angeordnet ist und einen an der Meßschrankoberseite angeordneten Materialzulauf (53) aufweist.

23. Vorrichtung nach Anspruch 18 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß in dem Probenrohr (43) ein Spülluftstutzen (49) angeordnet ist, der mittels einer Druckluftleitung mit dem Magnetventil (46) verbunden ist.

— Leerseite —

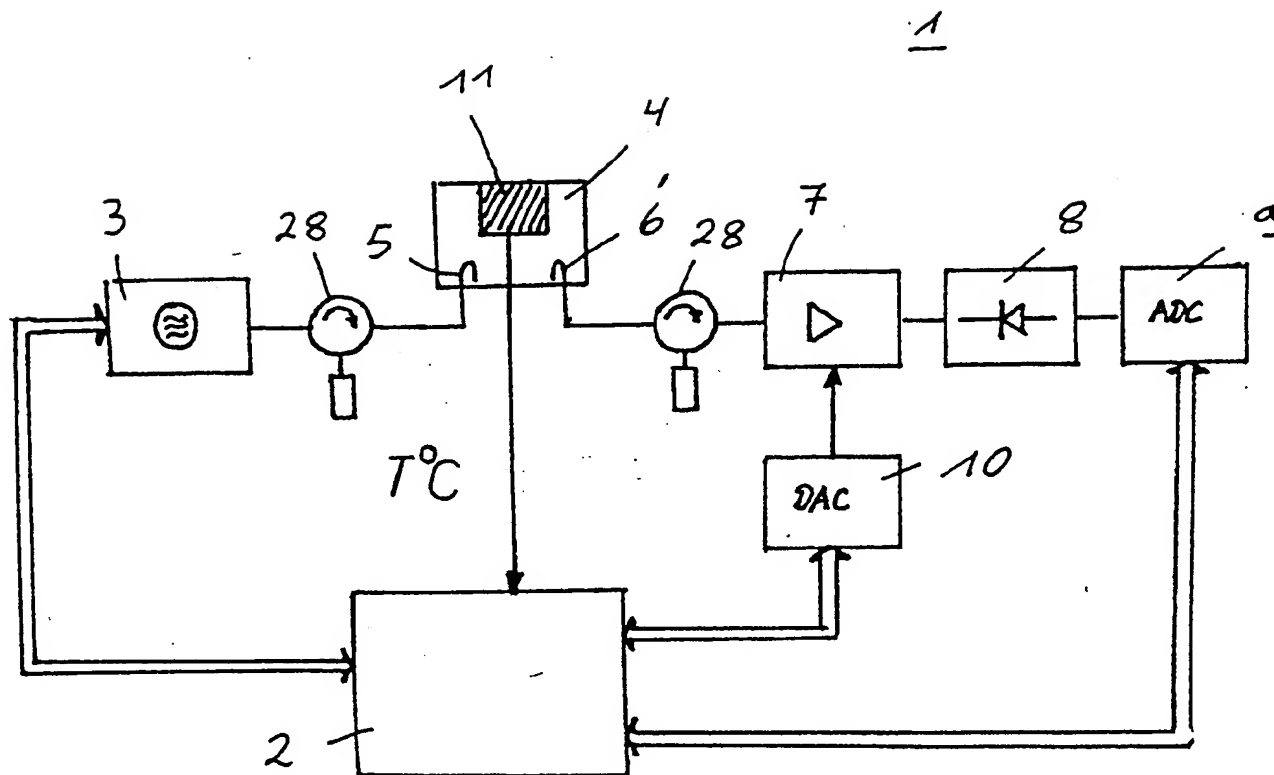


Fig.1

Fig. 2

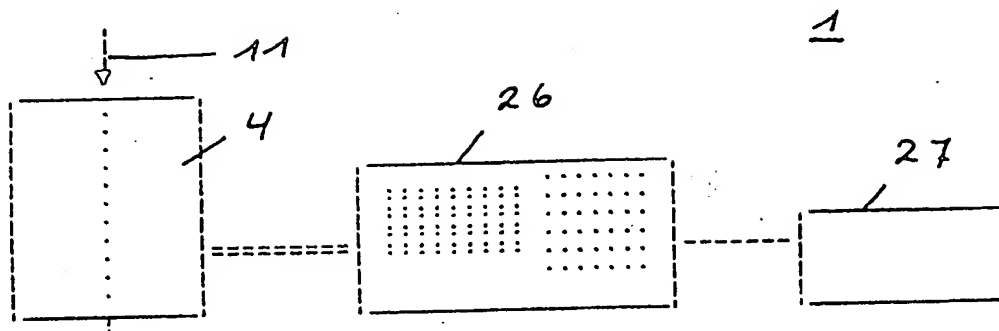
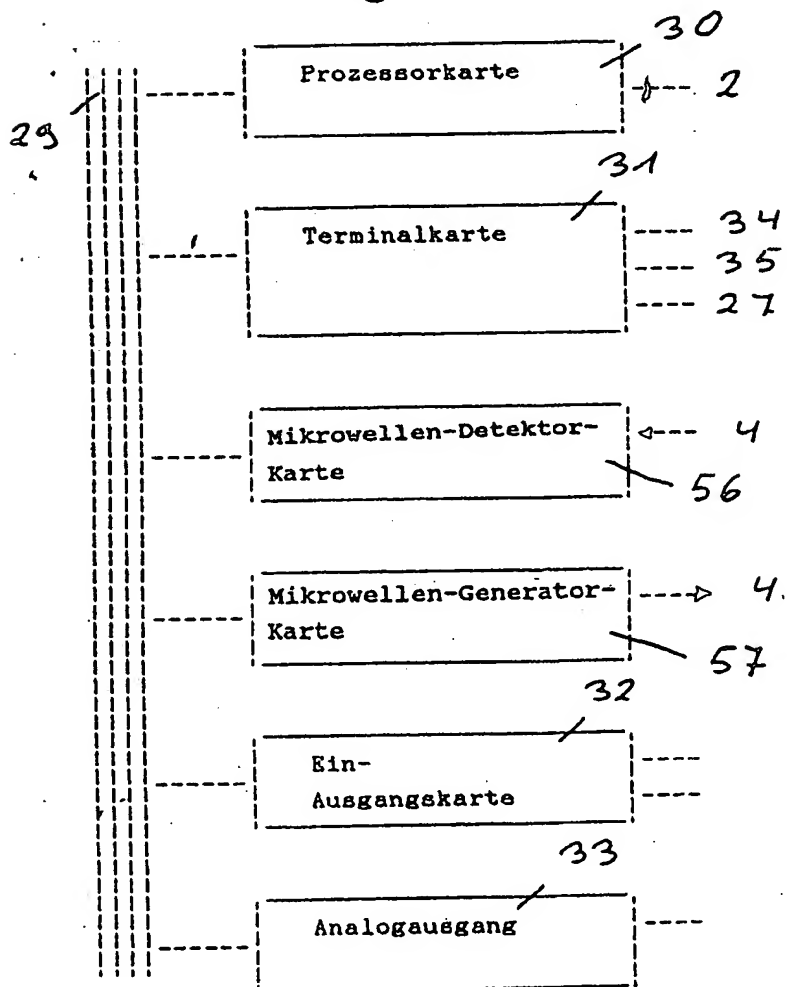


Fig. 3



(4)

Fig. 3a - 30 -

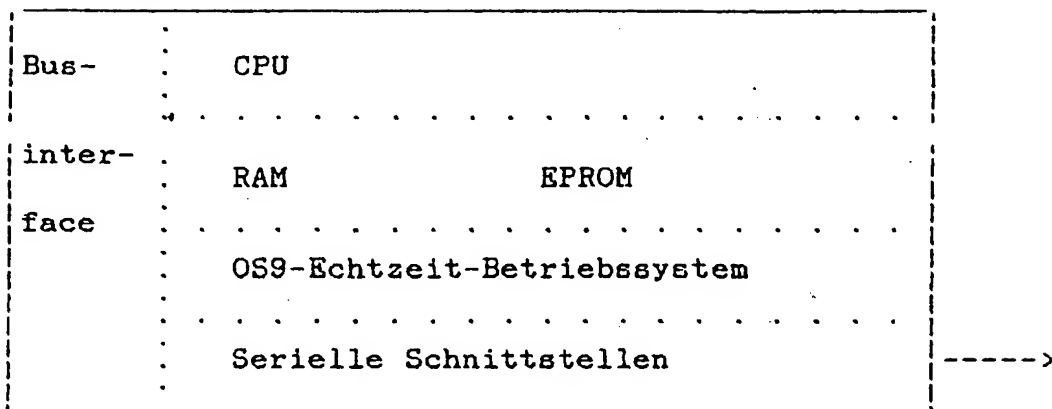


Fig. 3b - 31 -

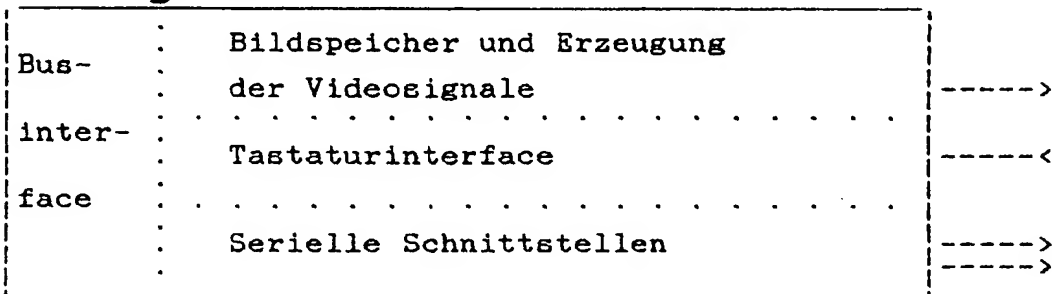


Fig. 3c - 32 -

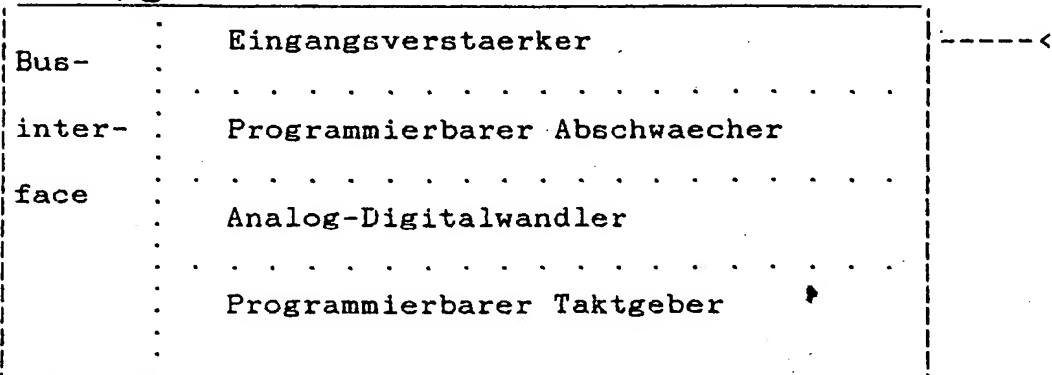


Fig. 3d

- 3 -

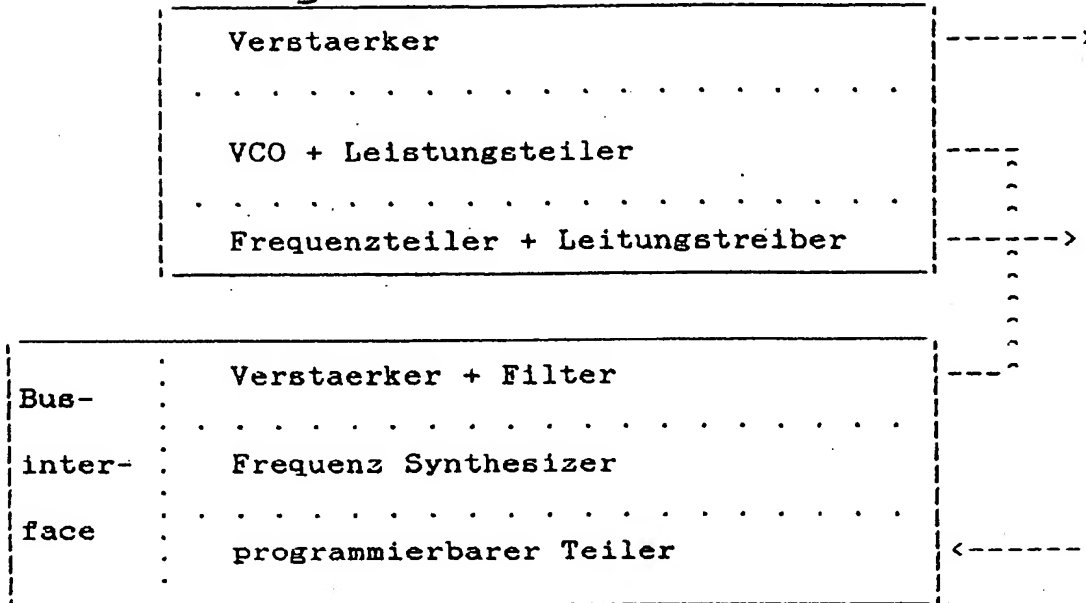


Fig. 3e

- 32 -

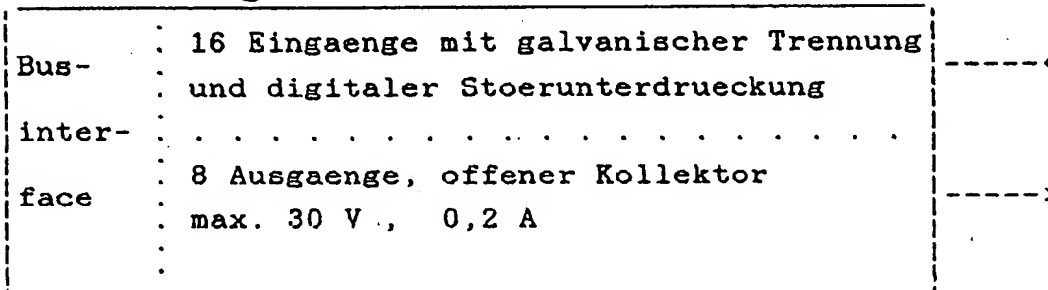
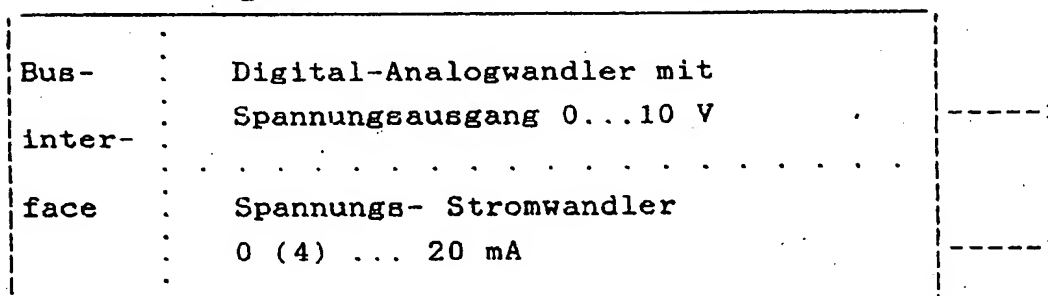


Fig. 3f

- 33 -



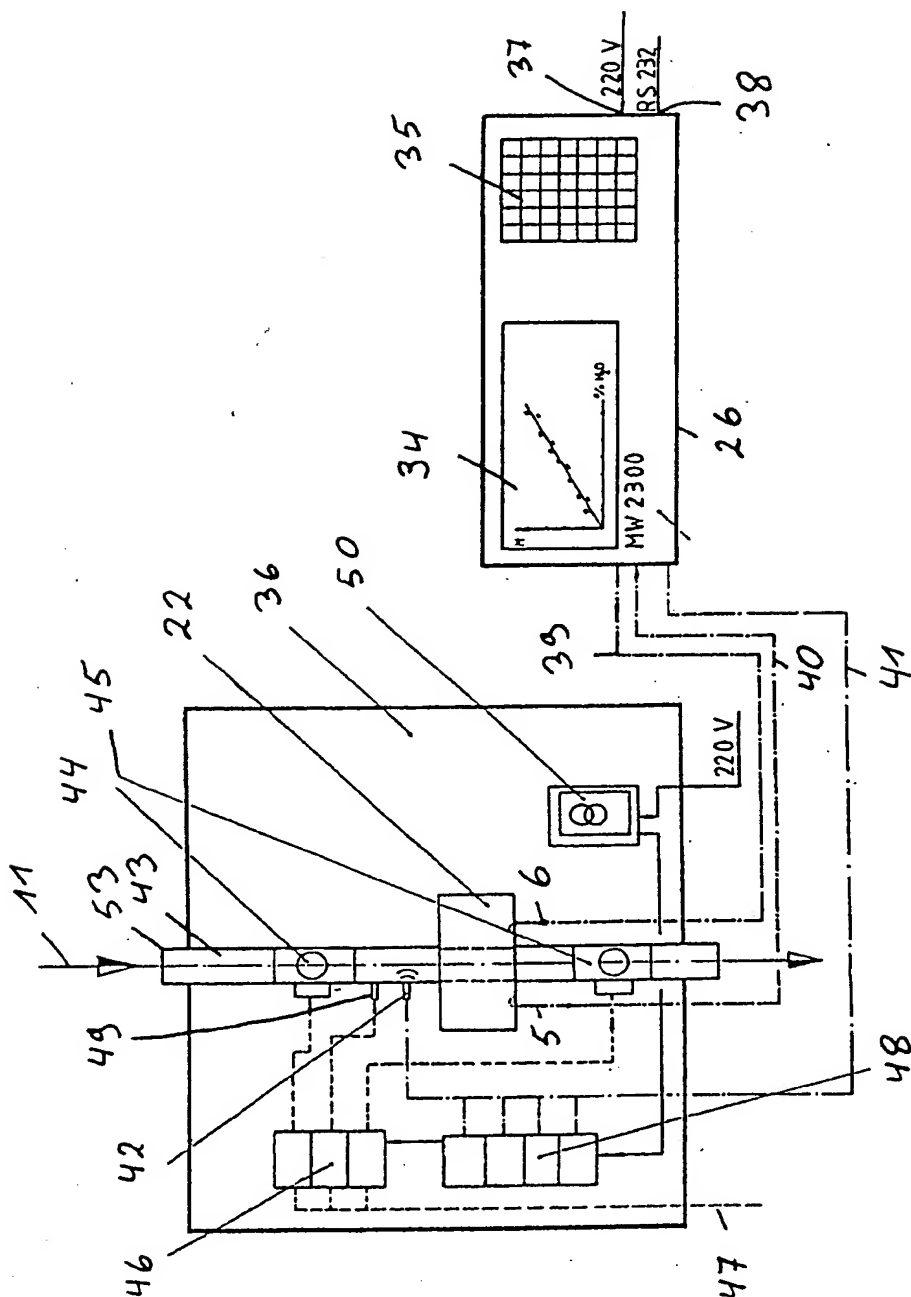
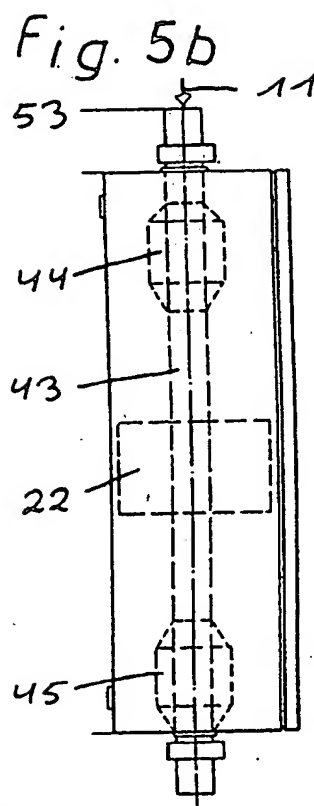
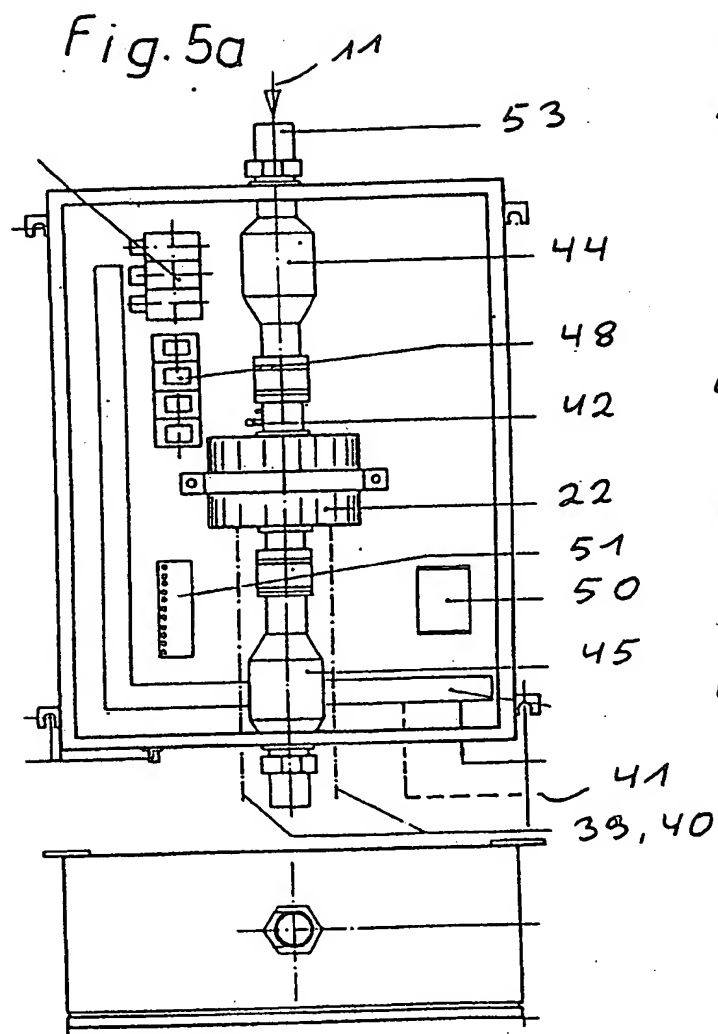
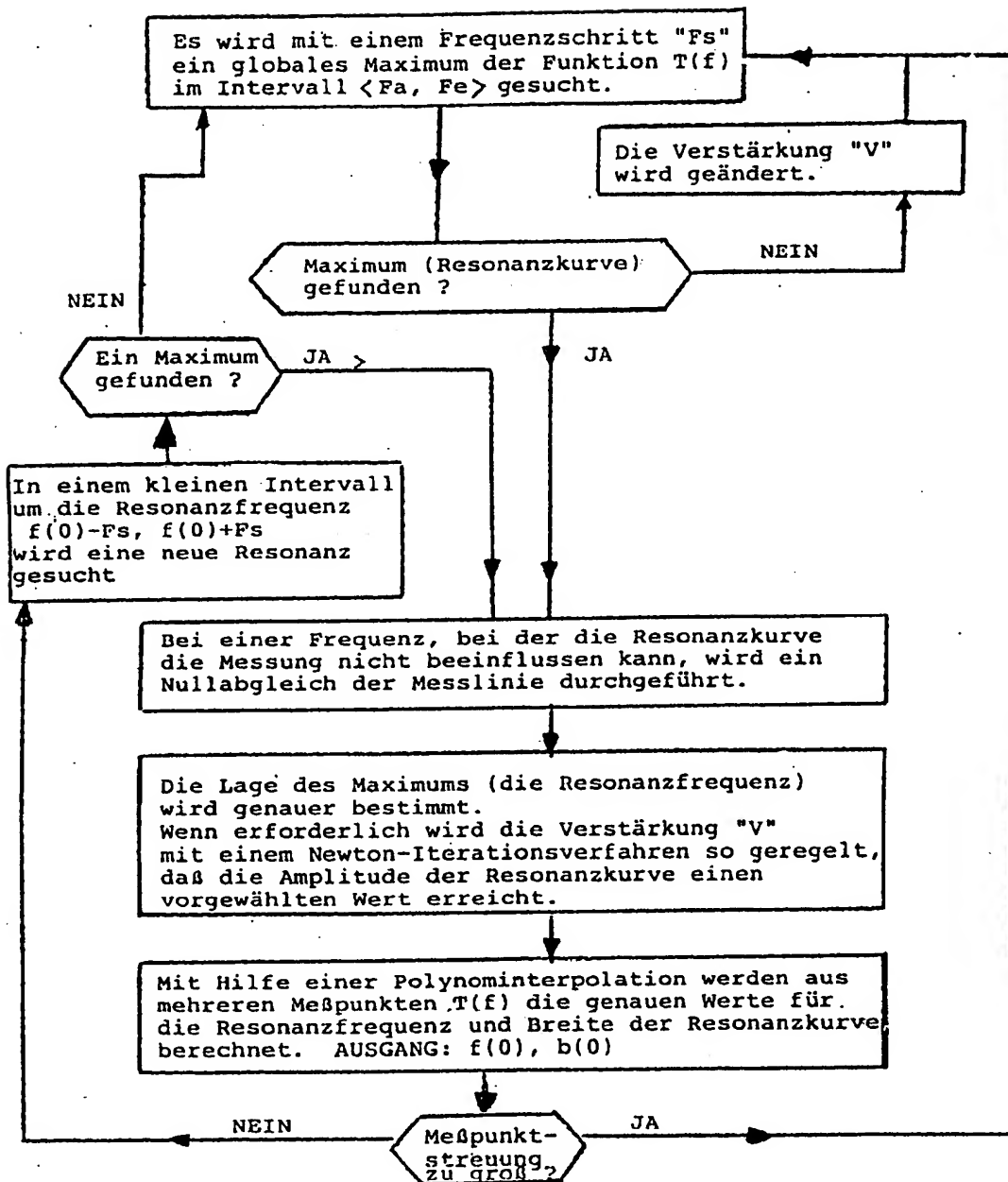


Fig. 4



*Fig. 5c*



## Benutzte Begriffe und Symbole:

f	: Die gewählte Frequenz des Mikrowellen-Oszillators
Resonanzkurve	: Der Frequenzgang des Leistung-Transmitanz-Signals eines Resonators. Das Maximum (maximale Amplitude)
$f(0)$	: Resonanzfrequenz
T(f)	: Die Leistung-Transmitanz des Resonators bei der Frequenz "f"
$b(0)$	: Breite der Resonanzkurve in der Höhe der halben maximalen Amplitude.
<Fa, Fe>	: Frequenzbereich in dem die Resonanz gesucht wird.
Fs	: Der kleinste angewandte Frequenzschritt - er sollte kleiner als die doppelte kleinste Breite der Resonanzkurve sein.
V	: Verstärkung des Mikrowellenverstärkers bzw. Abschwächers ( $V \geq 1$ )

Fig. 6

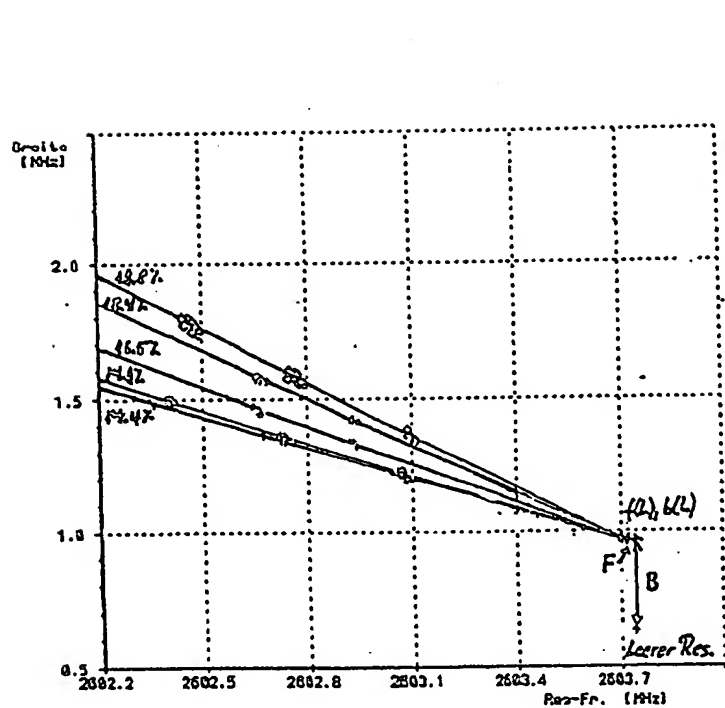


Fig. 7a

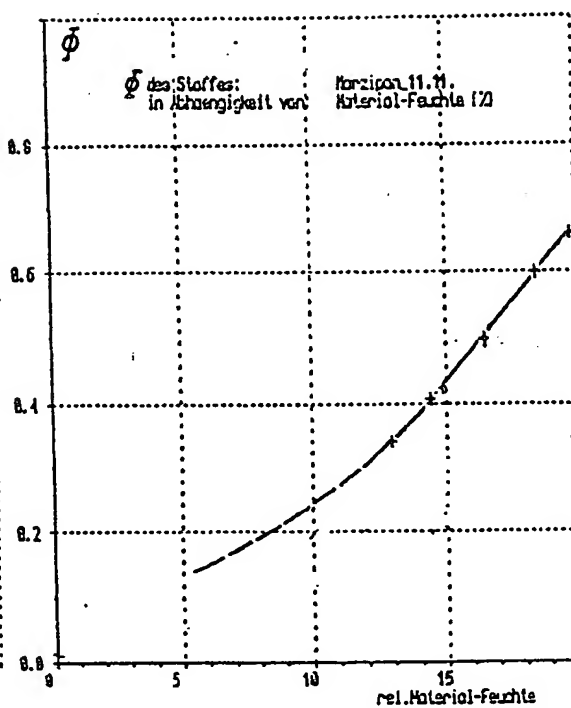


Fig. 7b

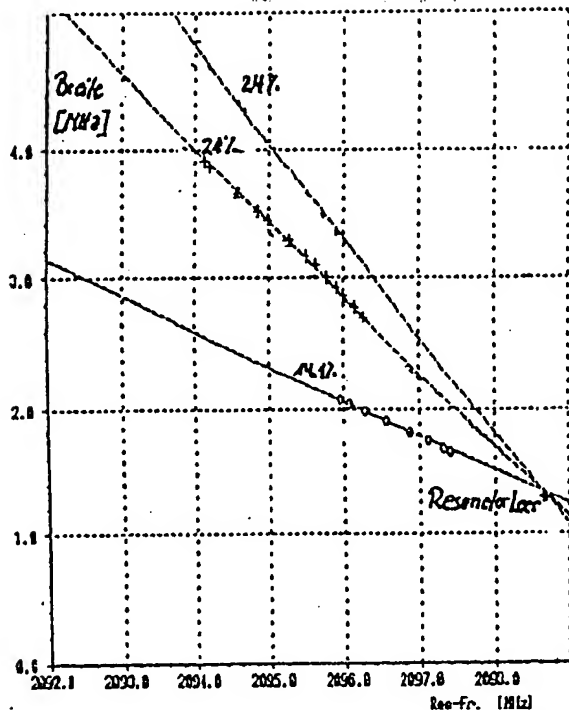


Fig. 8a

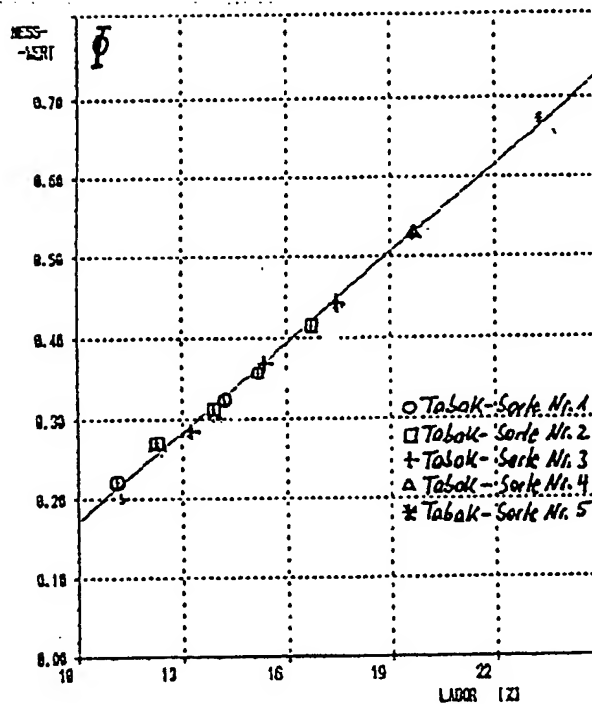


Fig. 8b

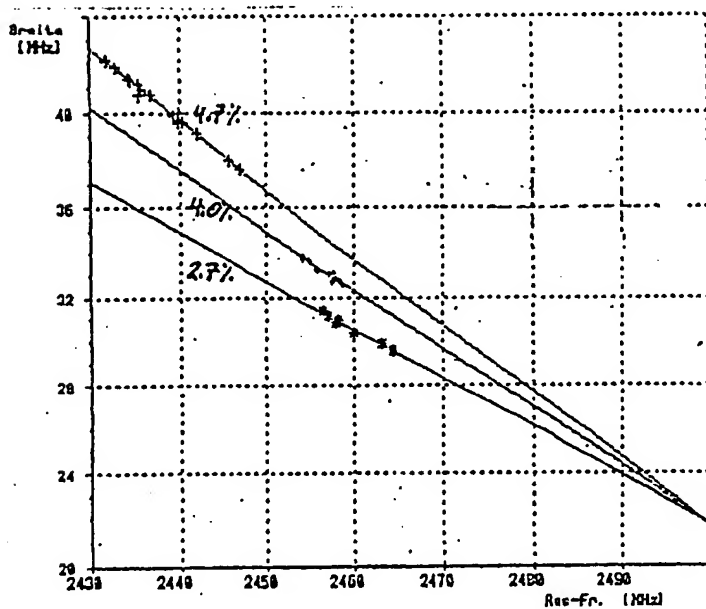


Fig. 9a

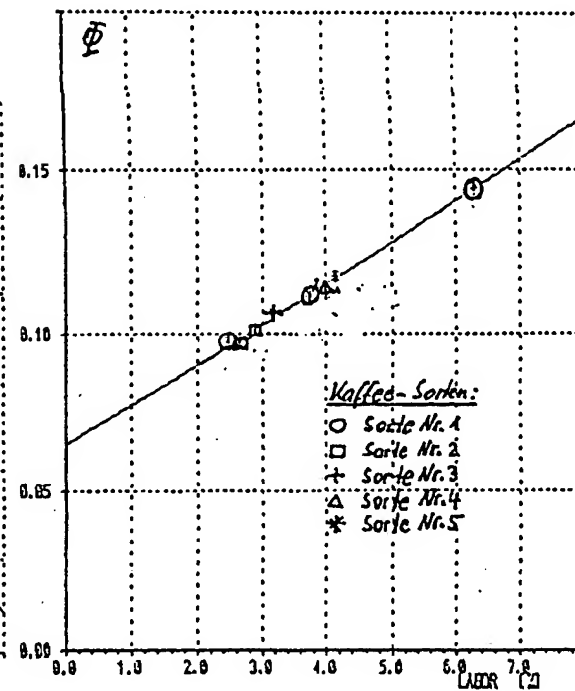


Fig. 9b

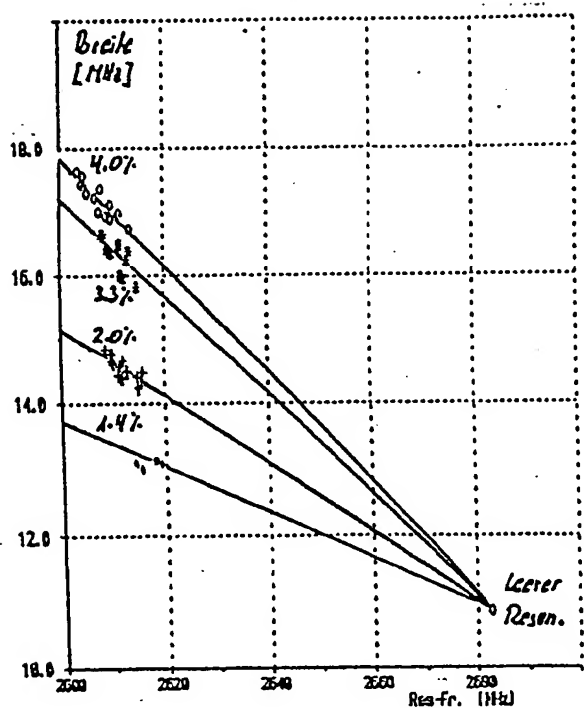


Fig. 10a

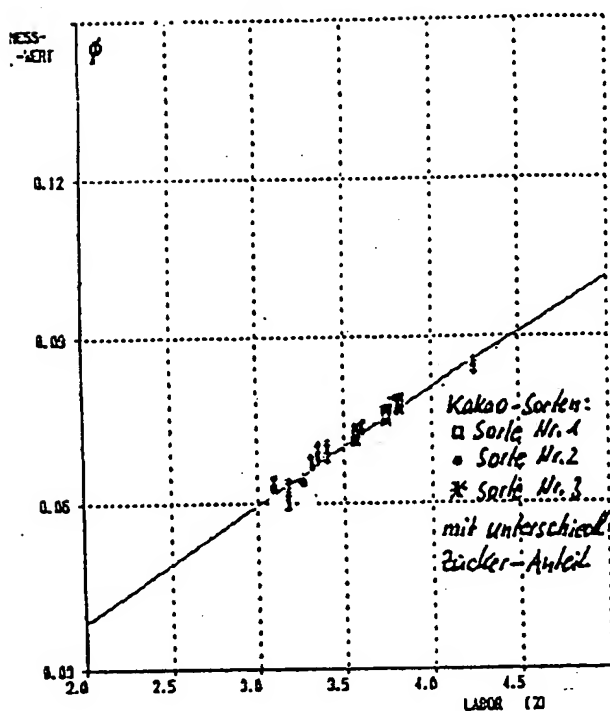


Fig. 10b

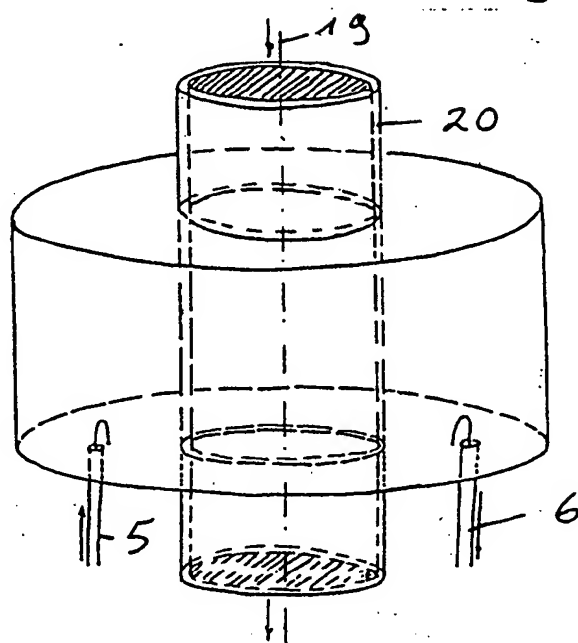


Fig. 11a

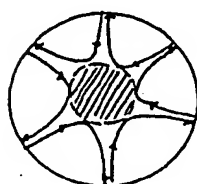


Fig. 11b

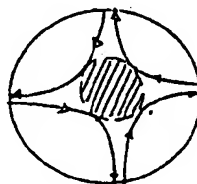


Fig. 11c

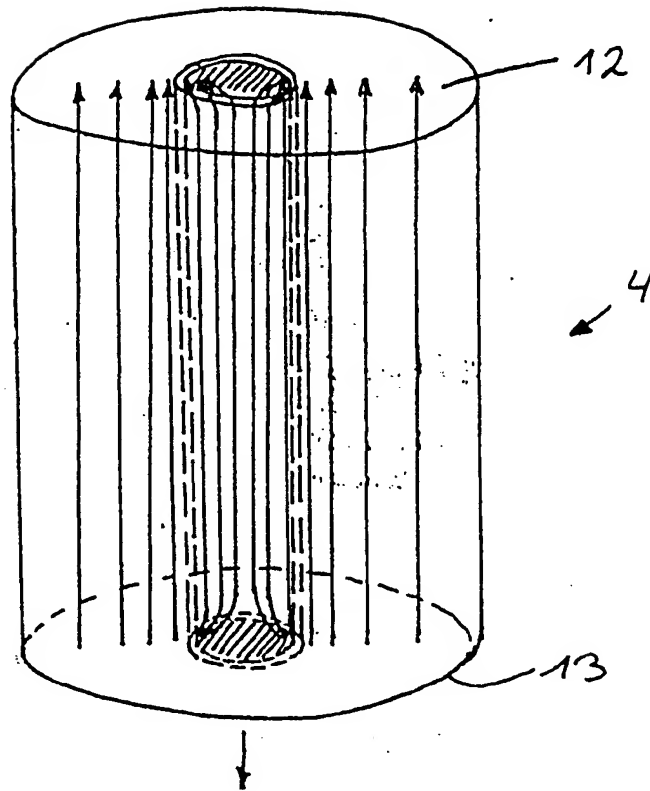


Fig.12

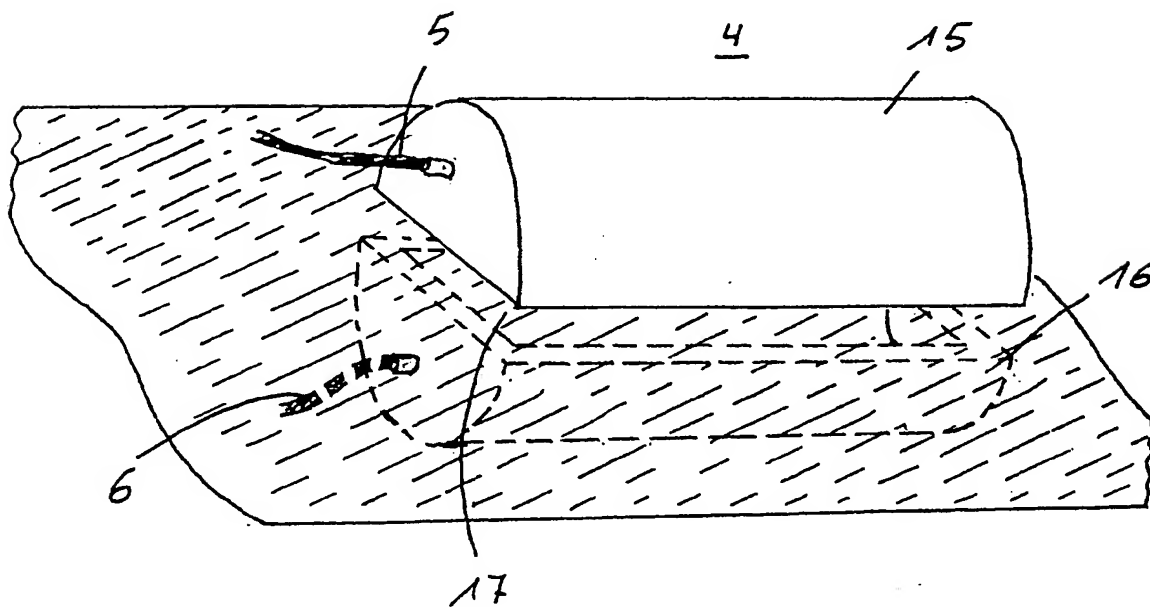


Fig.13

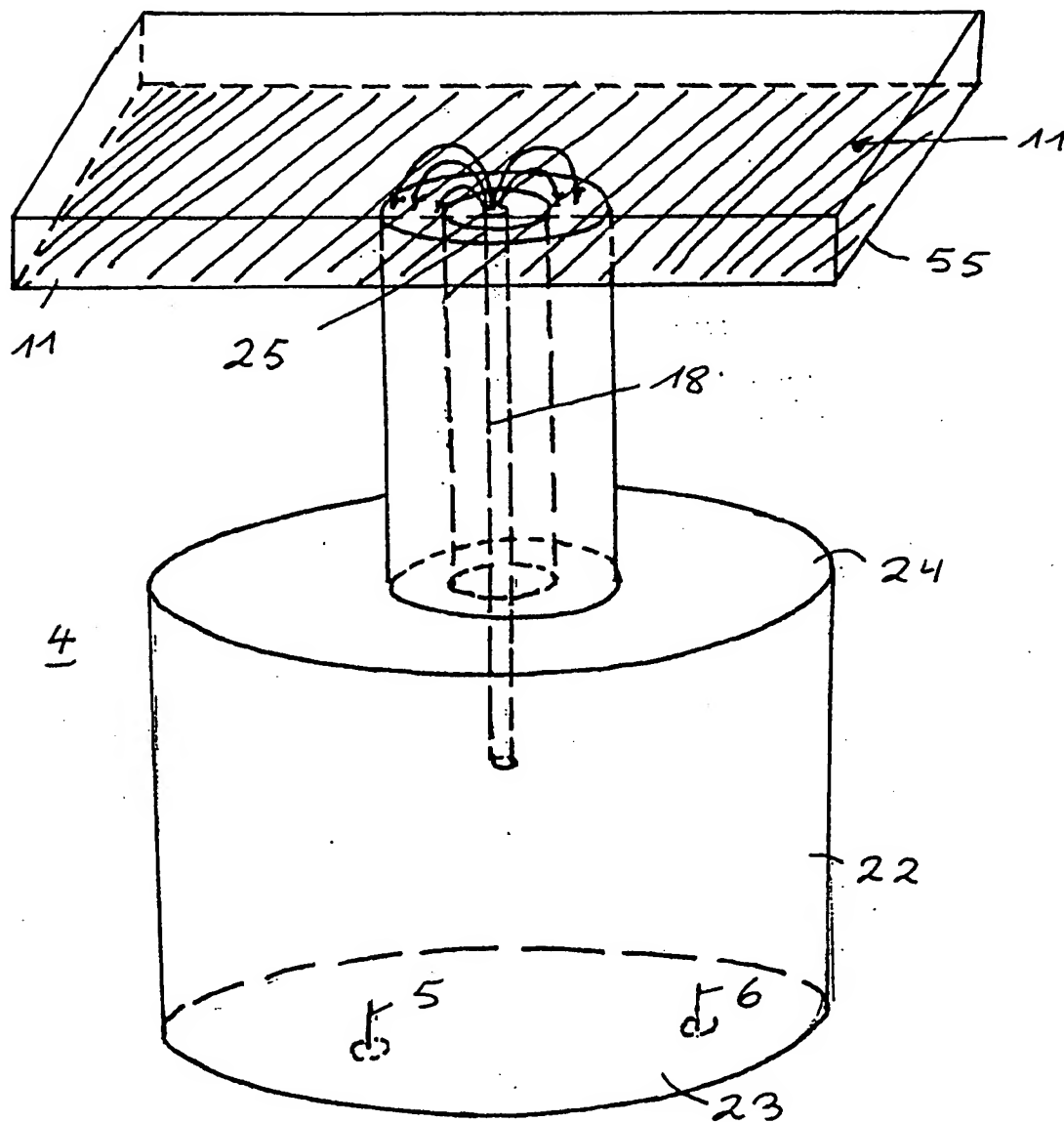


Fig. 14

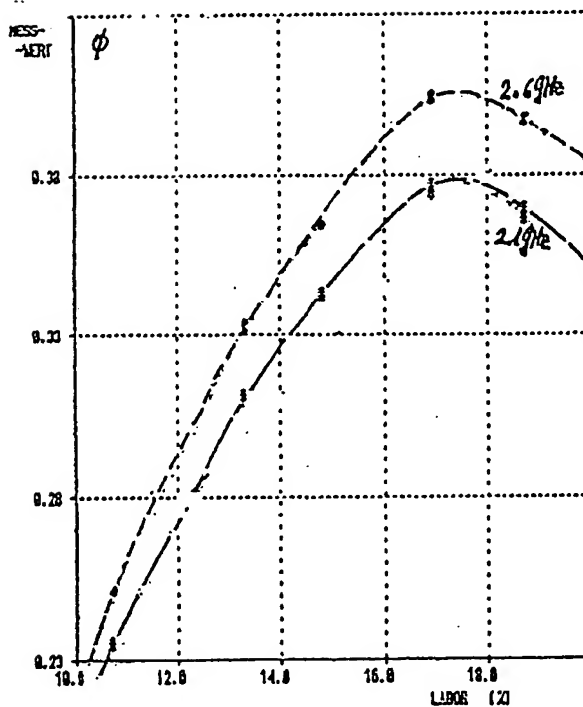
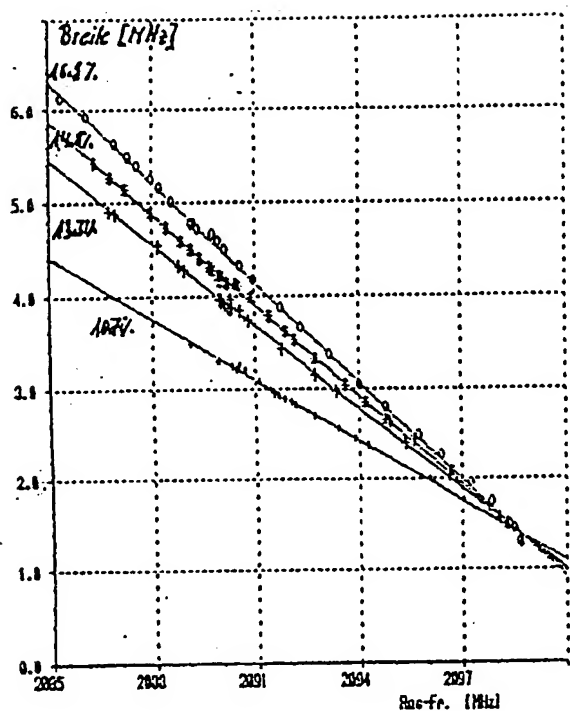


Fig.15

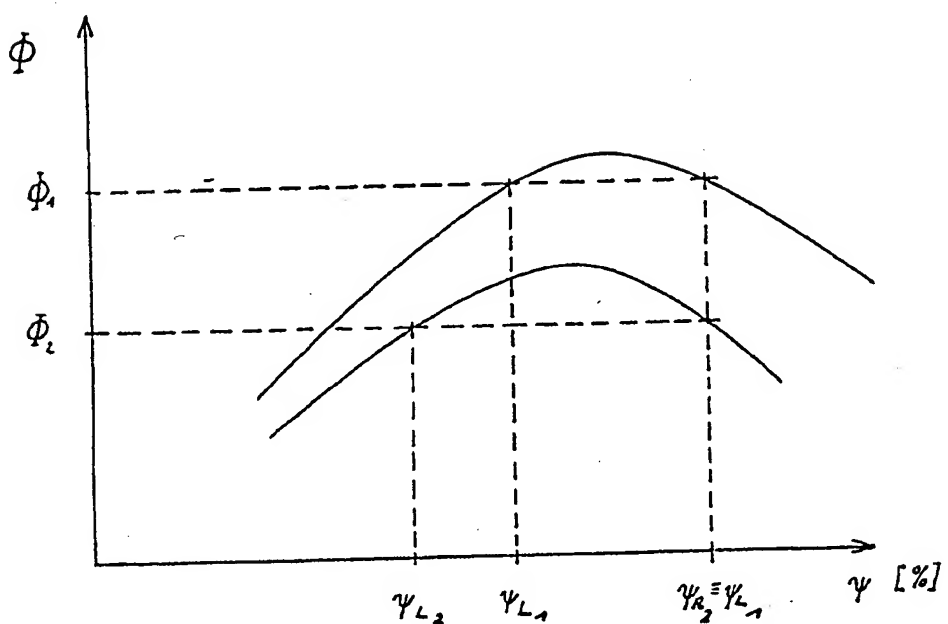


Fig.16